

Guiado de un vehículo autónomo mediante la detección de los límites del carril usando un escáner láser

F. Jiménez Alonso¹, M. Clavijo Jiménez², J. E. Naranjo Hernández³, O. Gómez Casado⁴

¹INSIA. Universidad Politécnica de Madrid. felipe.jimenez@upm.es

²INSIA. Universidad Politécnica de Madrid. miguel.clavijo@upm.es

³INSIA. Universidad Politécnica de Madrid. joseeugenio.naranjo@upm.es

⁴INSIA. Universidad Politécnica de Madrid. labie.insia@upm.es

Los vehículos autónomos están cada vez cobrando mayor repercusión, tanto con funciones de semiautomatización como de automatización completa. Se han explorado diferentes herramientas y tecnologías para realizar el control automático. En cuanto a tecnologías, el escáner láser 3D está cobrando gran ventaja dadas sus prestaciones. Cuando se plantea la estrategia de control en el caso de un vehículo totalmente autónomo, se pueden distinguir diversas soluciones: seguimiento de una trayectoria dada por waypoints definidos por sus coordenadas GPS, seguimiento de líneas, seguimiento del vehículo precedente, etc. Este artículo se centra en una solución para permitir el guiado autónomo de un vehículo en condiciones de pérdida de la señal GPS basándose en un escáner láser. De esta forma, se propone un algoritmo que permite la obtención de las variables necesarias para el control a partir del seguimiento de un elemento de referencia (muro, barreras laterales o líneas del carril). Con el fin de evitar la colocación del sensor en el techo del vehículo como es habitual en otros prototipos de vehículos autónomos peor que no resulta muy práctico en vehículos comerciales, se ha implementado un algoritmo basado en la simulación de la dinámica vehicular que permite mantener la robustez en las estimaciones del elemento de referencia. Se han realizado pruebas en el carril bus-VAO de la autovía A6 en la entrada a Madrid con resultados muy satisfactorios.

1. Introducción

Los vehículos autónomos están cada vez cobrando mayor repercusión, tanto con funciones de semiautomatización como de automatización completa [1]. En este sentido, debe definirse cómo realizar el control autónomo y la detección de potenciales obstáculos. Se han explorado diferentes herramientas y tecnologías para realizar el control automático. En cuanto a tecnologías, las que mayor auge han cobrado son la visión artificial, que puede proporcionar gran información pero con un alto coste computacional [2], y los escáneres láser, sobre todo cuando éstos han pasado de la configuración 2D a 3D con mucha más información [3]. En muchos casos, se opta por una fusión sensorial para paliar las carencias de cada una de las soluciones [4, 5].

Cuando se plantea la estrategia de control en el caso de un vehículo totalmente autónomo, se pueden distinguir diversas soluciones: seguimiento de una trayectoria dada por waypoints definidos por sus coordenadas GPS, seguimiento de líneas, seguimiento del vehículo precedente, etc. Por lo general, el uso del posicionamiento GPS es una solución muy extendida, si bien se encuentran dificultades claras cuando se producen deterioros o pérdidas de su señal [6]. En el primer caso, se puede recurrir a considerar también la información de sistemas inerciales de medida [7] y su integración mediante filtros de Kalman [8]. Sin embargo, esta solución no es viable si las pérdidas de la señal GPS se prolongan en el tiempo, como en el caso de un túnel de gran longitud [9].

Este artículo se centra en una solución para permitir el guiado autónomo de un vehículo en condiciones de pérdida de la señal GPS basándose en un escáner láser, cuyo tratamiento de datos es mucho más simple que el caso de visión artificial y no tiene las limitaciones ante cambios de luminosidad o ante condiciones ambientales adversas. De esta forma, se propone un algoritmo que permite la obtención de las variables necesarias para el control a partir del seguimiento de un elemento de referencia (muro, barreras laterales o líneas del carril). En dicho algoritmo se tiene en cuenta que la posición más apropiada para el sensor puede ser, como lo están siendo hasta ahora todos los sensores que se incorporan en vehículos comerciales, en la parte frontal (paragolpes o parabrisas), pero no encima del techo como se considera en otros vehículos autónomos [10].

2. Vehículo, equipamiento y aplicación

INSIA cuenta con 2 vehículos autónomos, un Citroen Pluriel y un Mitsubishi iMiev eléctrico, siguiendo éste último las prescripciones técnicas marcadas por la instrucción de DGT para realización de ensayos en circulación abierta [11]. La automatización implica tanto la velocidad como la dirección [12], estando dividida en una capa de bajo control y otra de alto que permite el guiado por diferentes medios como el telecontrol, el seguimiento de trayectorias o la realización de maniobras evasivas ante situaciones de riesgo [13].

Como sensor para identificar obstáculos y para la navegación autónoma, se ha utilizado un Velodyne VLP-16 3D LiDAR que mide distancias en tiempo real mediante la medición del tiempo de vuelo (Time of Flight). Es posible adquirir datos de 5 a 20 Hz, con un campo de visión horizontal de 360° y 30° distribuidos verticalmente en 16 capas, que proporciona hasta 300.000 puntos por segundo. Estos sensores se desarrollaron originalmente para las competiciones de vehículos autónomos de DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) [14] y actualmente se usan en una gran variedad de aplicaciones.

Como se ha comentado anteriormente, el sensor se monta en la parte delantera del vehículo, si bien, para la realización de pruebas y comparación de resultados, también se contempla su colocación en el techo del mismo. En concreto, en la Figura 1 se puede apreciar el escáner láser VLP-16 ubicado en el frontal del Citroen Pluriel y en el techo.



Figura 1. Ubicación del sensor Velodyne VLP 16 en el vehículo autónomo de INSIA

La aplicación planteada con este vehículo autónomo consiste en la supervisión del carril Bus-VAO de la entrada a Madrid por la autovía A6 con el fin de establecer que se encuentra libre de vehículos tras el momento de cierre del carril y antes de la apertura del mismo en sentido contrario. Esta tarea es realizada actualmente con un vehículo conducido manualmente. Sin embargo, al tratarse de un entorno controlado, la automatización de esta tarea resulta sencilla en los estados actuales de automatización de vehículos (niveles de automatización 3-4 según SAE).

El carril bus-VAO es una calzada separada de las principales de la A6, que funciona de forma reversible en función del sentido del tráfico más denso y que tiene 2 carriles, con una longitud de 11 km. Está separado de las otras calzadas mediante barreras New Jersey. Por otra parte, cuenta con un número limitado de accesos con la particularidad de que una de las barreras no tiene interrupción en todo el recorrido por lo que podría ser tomada como referencia.

En la aplicación planteada, el vehículo recorre el carril de forma autónoma detectando si existe algún otro vehículo u obstáculo en el mismo y deteniéndose en caso de que así sea.

3. Algoritmo

Para el movimiento del vehículo de forma autónoma basado en la información del escáner láser, se plantean 2 submódulos: seguimiento de elemento de referencia y detección de obstáculos para su esquivar o detención del

vehículo. En este artículo nos centraremos específicamente en el primer problema ya que el segundo ya ha sido tratado en publicaciones previas [15].

Para hacer el seguimiento de un elemento de referencia como es el caso de la aplicación prevista, el controlador requiere conocer los errores angulares y laterales del vehículo respecto de la referencia y se ha comprobado experimentalmente que la robustez de estos datos se incrementa si es posible obtener datos del elemento de referencia delante y detrás del vehículo. Sin embargo, esta condición obliga a colocar el sensor sobre el techo del vehículo, lo que resulta una ubicación de difícil integración en los vehículos actuales. Otra alternativa consiste en emplear más de un sensor y recurrir a fusión sensorial, con el coste asociado que ello tiene. Como se ha indicado anteriormente, se busca con el algoritmo desarrollado el poder colocar el sensor en la parte frontal del vehículo sin reducción significativa en la calidad y robustez de los datos capturados.

Por otra parte, cabe indicarse que, como elemento de referencia pueden adoptarse 2 en este entorno: las líneas que delimitan los carriles y, referentemente, las líneas continuas que delimitan los laterales, ya que la línea central entre los carriles es línea discontinua, o las barreras New Jersey que separan el carril bus-VAO de las calzadas principales de la autovía A6. Se ha escogido la segunda opción ya que la información captada de la referencia es más fiable y no es tan sensible a la pérdida de algunos puntos o la distorsión de los mismos. En caso de escoger la primera opción, para la que también sería válida el algoritmo que se plantea a continuación, habría que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La detección de las líneas de carril mediante un escáner láser se realiza en base a la medición de la reflectividad de la señal. Esta medida es mucho más sensible que la detección de un objeto por lo que tiene una mayor incertidumbre y puede estar sujeta a mayores errores
- Un elemento de pequeñas dimensiones puede no ser detectado de forma continua por un escáner láser en cuanto la distancia entre ambos sea superior a un cierto umbral ya que la divergencia de los rayos hace que dicho elemento se encuentre entre dos rayos consecutivos y no sea percibido. En el caso de las líneas de la carretera esto es fácil que ocurra desde distancias relativamente cortas dada la poca anchura de la línea. Este hecho hace que la percepción de la línea se prolongue sólo unos pocos metros por delante del vehículo.

A partir de la información que es posible obtener por los sensores LiDAR 3D en el reconocimiento del entorno de los AV, se han logrado avances en el problema de la Localización y Modelado Simultáneos (SLAM) [16], lo cual es de aplicación fundamental en este trabajo. En general, las técnicas de SLAM van construyendo incrementalmente el mapa virtual del entorno por el que circula el AV para que éste pueda ser situado en el mapa. Por ello, la detección de obstáculos en entornos urbanizados y las técnicas de SLAM son hoy los campos de investigación más importantes en cuanto a navegación autónoma se refiere.

Para mantener la carga computacional baja en todo el sistema, y cuando las características del objeto y su detección hacen irrelevante su altura, se puede abordar el problema construyendo el modelo 2D a partir de la información 3D de la nube de puntos, tal y como se hace en los algoritmos del estado del arte [17]. En dicho artículo basan sus cálculos en la tecnología LiDAR, realizando el modelo 2D para el seguimiento de los obstáculos obtenidos de datos 3D.

Como se menciona en [17], el procedimiento general seguido para la detección de obstáculos se divide en tres etapas: 1) Segmentación de datos, 2) Asociación de datos y 3) Filtro Bayesiano. En la primera etapa, los datos son obtenidos directamente del sensor y son divididos en clusters, asociando estos posibles obstáculos con características parecidas [18,19], y es en la segunda etapa donde estos clusters son asignados al tipo de obstáculo para poder realizar el tracking del mismo. El tercer paso se suele llevar a cabo mediante un filtro de Kalman para mejorar la adaptación de los datos a los objetivos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el algoritmo realizado para la navegación autónoma del vehículo consta de siete pasos:

Paso 1, se selecciona la región de interés (ROI). Esta región se define en función de la velocidad del vehículo y las distancias de anticipación mínima y máxima. Se han calculado estos parámetros para garantizar una conducción segura y un control robusto. Descartando los puntos que quedan fuera de esta zona de interés, la carga computacional del sistema se reduce drásticamente.

Paso 2, se realiza una triangulación de Delaunay con la nube de puntos restante en función de la distancia entre ellos. Agrupando los puntos, formando triángulos, es posible crear superficies que caracterizan el entorno para el análisis y clasificación.

Paso 3, una vez que se obtiene el mallado de la superficie, es posible calcular la ecuación de cada triángulo, y por tanto la de su vector normal. De esta forma, es posible comparar la orientación de cada cara con el cálculo del ángulo formado entre la vertical y el vector normal a la superficie.

Paso 4, se establece un filtro para detectar todos los posibles obstáculos, muros y/o barreras. Según la geometría de las barreras New Jersey, la orientación de sus caras laterales se encuentra entre 75° y 90° grados, por tanto, se fija dichos umbrales para el filtrado de cada uno de los triángulos de la malla anteriormente calculada. Si la condición resulta positiva, las coordenadas de los vértices del triángulo, pasan a formar parte de la lista de candidatos de pertenecer al muro de referencia.

Paso 5, cuando se realiza la operación de segmentación. Una vez que se tiene la lista de todos los puntos candidatos a pertenecer a un obstáculo, se realiza el cálculo de la segmentación únicamente con sus coordenadas “x y”, ya que la coordenada “z” ha sido utilizada para calcular la orientación de la superficie y no tiene mayor importancia a partir de este punto. De esta manera el algoritmo de clustering, trabaja en 2D, reduciendo su complejidad. En este caso se ha utilizado un algoritmo basado en la distancia euclídea entre los puntos y su densidad llamado DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise). Tras el cálculo de la segmentación, la lista de puntos de candidatos queda clasificada en los muros, barreras y obstáculos detectados por el sensor. Con el fin de poder realizar la navegación y el posicionamiento del vehículo autónomo, se selecciona aquel conjunto que comparte las características con el elemento de referencia al guiado. En este caso, la barrera New Jersey utilizada como referencia, se sitúa a un lateral del vehículo y longitudinalmente a éste.

Paso 6, una vez seleccionado el conjunto correcto, es posible calcular la ecuación que satisfaga la geometría de la barrera utilizando una regresión de segundo grado.

Paso 7, obtenida esta ecuación, se procede al cálculo de las dos variables necesarias para el control de la navegación del vehículo que, como se ha mencionado anteriormente, son el error lateral y el error angular. Para calcular dichos errores, en primer lugar se calcula el punto $P(x^*_0, y^*_0)$, perteneciente a la regresión y cuyo vector normal pasa por la localización del sensor. Y por tanto, el error lateral y el error angular son obtenidos según:

$$\begin{aligned} \text{Lateral error (LE)} &= \sqrt{x^{*0}_0{}^2 + y^{*0}_0{}^2} \\ \text{Angular error (AE)} &= \text{asin}\left(\frac{y^*_0}{\text{Lateral error}}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

En caso de que el sensor se sitúe en la parte frontal del vehículo, no se recibirá información de los puntos pertenecientes a la barrera New Jersey en la parte trasera del AV, debido a la sombra producida por el propio vehículo. Esto hace que el comportamiento del algoritmo para la navegación sea menos estable y que el cálculo de las variables de control no sea tan preciso. Esta falta de precisión en los cálculos es compensada cuando sí se dispone de la información completa del entorno, es decir, al detectar los puntos pertenecientes a la barrera tanto hacia delante como hacia atrás del AV. Por tanto, se propone reconstruir el entorno por donde ha circulado el vehículo haciendo uso de técnicas de SLAM. De esta manera, es posible utilizar la trayectoria seguida por el vehículo como referencia de los puntos detectados en instantes anteriores y completar la información carente. Debido a que el uso de puntos GPS no es fiable, aún utilizando corrección diferencial [20], o por pérdidas de señal en algunos entornos, el método propuesto estima la trayectoria del vehículo a partir del estudio de las variables de conducción, como el giro del volante y la velocidad, ambas obtenidas a través de la información proporcionada por el BUS-CAN del vehículo, pero sin recurrir a sensores inerciales de ángulo por el error que éstos pueden tener si el sensor es de bajas prestaciones [20].

Para poder extrapolar los datos del elemento de referencia hacia el área donde no se tiene información, se debe reconstruir fielmente la trayectoria del vehículo. Para realizar dicha extrapolación mediante la simulación de la dinámica del vehículo, se ha utilizado el modelo de 14 grados de libertad (gdl) [21]. Implementar este modelo no requiere un alto coste computacional, pero se puede simplificar para asegurar la ejecución en tiempo real. A tal fin, en lugar de utilizar el modelo simplificado de 3 gdl. (modelo de dos ruedas), se ha optado por realizar una tabla off-line. Esta tabla ha sido generada con el modelo completo de 14 gdl. utilizando como parámetros de entrada la velocidad y el giro de las ruedas directrices. Como parámetro de salida, se obtiene la variación del ángulo de guiñada. De esta forma se puede determinar la evolución de la trayectoria en coordenadas locales:

$$\begin{aligned} \Delta x^* &= v \cdot \Delta t \cdot \cos(\varphi'_z \cdot \Delta t) \\ \Delta y^* &= v \cdot \Delta t \cdot \sin(\varphi'_z \cdot \Delta t) \end{aligned} \quad (2)$$

donde Δt es el tiempo discreto entre dos iteraciones.

Sin embargo, un factor que no se tiene en cuenta en el anterior modelo matemático y que puede tener una influencia significativa en el cálculo de la trayectoria es el peralte de la carretera. El peralte puede resultar en una desviación importante en la estimación de la trayectoria del vehículo, más cuando dicho error se integra en el tiempo al estimar trayectorias de largas distancias. Para no incrementar la carga de las variables utilizadas como entrada en la tabla del modelo matemático, se ha optado por corregir el ángulo de las ruedas directrices en función del peralte. Para ello, a partir del conocimiento del peralte de la calzada por donde circula el AV y a través del modelo simplificado de comportamiento virador es posible calcular la corrección en el ángulo de las ruedas directrices necesario. Dicha corrección realimenta la información obtenida del giro real de las ruedas, para obtener el parámetro de entrada corregido y reconstruir finalmente la trayectoria tal y como se muestra en el diagrama descriptivo de la figura 2.

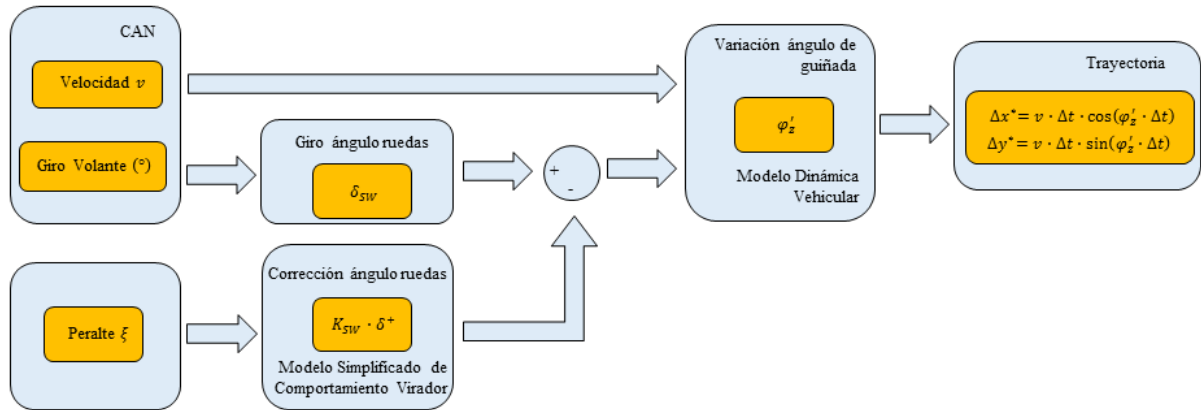


Figura 2. Diagrama descriptivo de la técnica de SLAM utilizada

Analizamos a continuación cómo corregir el efecto del peralte. Como muestra la Figura 3, la fuerza gravitacional F_y actúa transversalmente al vehículo debido al peralte de la calzada, sin haber ninguna otra fuerza aplicada en esa dirección en el centro de gravedad. Teniendo,

$$F_y = P \cdot \sin \xi \quad (3)$$

donde P es el peso de vehículo y ξ el ángulo de peralte.

Esta fuerza provoca esfuerzos en las ruedas para alcanzar el equilibrio, que son dados por:

$$F_{yaf} = \frac{F_y}{\cos \delta^+} \frac{l_2}{l_1 + l_2} \quad (4)$$

$$F_{yar} = F_y \frac{l_1}{l_1 + l_2}$$

donde δ^+ es el ángulo de giro de las ruedas delanteras y l_1 y l_2 son las distancias entre el eje delantero y el trasero y el centro de gravedad, respectivamente.

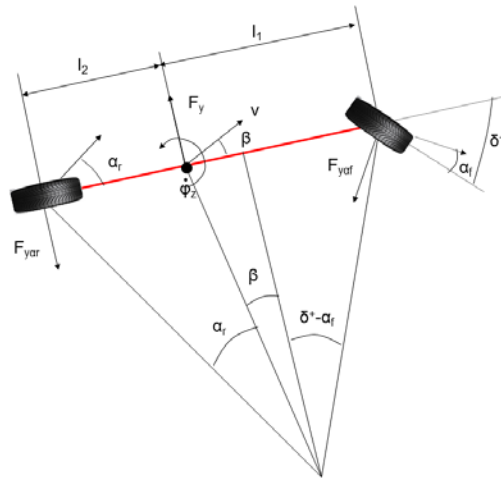


Figura 3. Esquema del modelo de vehículo simplificado

Suponiendo que el comportamiento es lineal entre las fuerzas laterales en los neumáticos y sus ángulos de deriva y que la rigidez de deriva es constante, entonces dichos ángulos pueden ser calculados.

Para mantener una trayectoria rectilínea, el ángulo de deriva del vehículo debe ser nulo. Considerando la figura 3, esta condición sólo se satisface cuando se cumple que la proyección ortogonal del centro instantáneo de rotación cae en el centro de gravedad, es decir:

$$\frac{\tan(\delta^+ - \alpha_r)}{l_1} = \frac{\tan(\alpha_r)}{l_2} \quad (5)$$

Por tanto, el ángulo de giro es dado por:

$$\frac{\tan\left(\delta^+ - \frac{P}{K_{af}} \frac{\sin \xi}{\cos \delta^+} \frac{l_2}{l_1 + l_2}\right)}{l_1} = \frac{\tan\left(\frac{P}{K_{ar}} \sin \xi \frac{l_1}{l_1 + l_2}\right)}{l_2} \quad (6)$$

Así, conociendo el ángulo de peralte en cada instante es posible, por tanto, calcular la corrección sobre el ángulo de giro medido en el vehículo. Restando este valor de corrección al valor medido en el vehículo, obtenemos el parámetro de entrada de la tabla del modelo matemático.

4. Resultados experimentales

El algoritmo desarrollado es válido para el seguimiento de cualquier elemento de referencia evitando el uso de receptores GPS con los problemas asociados que tiene dicha señal. De esta forma, permite el guiado en túneles sin cobertura GPS. También puede ser empleado en cualquier otro entorno aplicado al seguimiento de líneas blancas de la carretera, donde el algoritmo aumenta su potencial ya que la distancia máxima a la que son percibidas las líneas de la carretera es bastante limitada dada la divergencia de los rayos y el escaso espesor de las líneas. En ese caso, se plantea como un uso redundante con la señal GPS con el fin de evitar saltos en la señal de éste.

Se ha planteado y realizado una aplicación en un entorno concreto de carretera real en el que se han realizado pruebas de funcionamiento del algoritmo. Para ambas funciones, guiado y detección de obstáculos, es suficiente el empleo de un único sensor: el escáner láser tridimensional. Puesto que la detección de obstáculos ha sido ampliamente probada con anterioridad [15], se muestran a continuación únicamente los resultados de los ensayos realizados para comprobar la fiabilidad de las señales empleadas para el guiado. La tabla 1 muestra los resultados de dos situaciones respecto a la de referencia que consiste en colocar el sensor en el techo del vehículo y obtener datos delante y detrás del mismo. Las dos situaciones comparadas son: estimación de variables de control considerando únicamente los puntos delante del vehículo (equivalente a la colocación del sensor en la parte frontal) y estimación empleando dichos puntos y extrapolando los puntos detrás del vehículo mediante el algoritmo propuesto. Como se puede observar, la segunda solución es mucho más satisfactoria que la primera, llegando a resultados muy próximos a la situación ideal de percepción del entorno completo con el sensor mientras que la percepción únicamente de la parte delante del vehículo implica fuertes desviaciones que pueden redundar en problemas e inestabilidades para el controlador

Tabla 1. Comparación errores del algoritmo.

	Sensor situado en la parte delantera	Sensor situado en la parte delantera con extrapolación
Error lateral (%)	11,88	1,65
Error angular (%)	331,25	32,39
Curvatura (%)	736,78	4,89
Radio de curvatura (%)	88,05	4,62

El sistema final no confía únicamente en el sensor láser sino que se considera la fusión de su información con la señal de GPS. Sin embargo, la potencia del método permite que no sea necesaria corrección diferencial en la señal de GPS ya que las perturbaciones de su señal son absorbidas por la detección que se realiza con el láser que se ha comprobado que es suficiente para el guiado autónomo y la detección de obstáculos. En este sentido cabe indicarse que, en entornos como el descrito, aunque no hay la presencia de árboles o edificios altos cerca de la carretera que distorsionen la calidad de la señal del GPS, sí es cierto que los pasos elevados e, incluso, los paneles de información variable, pueden incidir en ella. Además, la solución de recurrir a correcciones diferenciales de GPS tampoco ofrece una fiabilidad total si se emplean bases de referencia que estén alejadas de la zona de ensayo, con lo que, con la infraestructura actual en este sentido, quedaría muy limitada su aplicabilidad a la red de carreteras.

5. Conclusiones

En este artículo se ha propuesto una solución que permite la colocación de un único sensor en la parte frontal del vehículo para el guiado autónomo del mismo, válido también para la detección de obstáculos, y estimar los puntos del elemento de referencia que se está siguiendo en base a la dinámica del vehículo. Los resultados experimentales han demostrado una clara mejoría de la estabilidad de los parámetros de guiado cuando se obtienen datos del elemento de referencia delante y detrás del vehículo. Aunque existen algoritmos potentes de reconstrucción del entorno, éstos suelen implicar una alta carga computacional y, en muchos casos, no pueden ser ejecutados en tiempo real. Por ello, la propuesta de este artículo supera dichos algoritmos en cuanto a tiempo de cómputo, ofreciendo una fiabilidad suficiente para el guiado.

El algoritmo planteado, basado en la simulación de la dinámica vehicular, permite reconstruir el elemento de referencia cuando éste ya ha dejado de ser percibido. Esta solución es válida para el caso de que el elemento de referencia para el guiado sea un muro lateral (por ejemplo, en un túnel), si bien su uso es mucho más crítico cuando se realiza el seguimiento de las líneas de la carretera mediante un escáner láser. Para este seguimiento, la visión artificial tiene un alcance mayor, pero el láser detecta las líneas por cambios en la reflectividad en los puntos detectados y, dado el reducido ancho de dichas líneas, éstas dejan de ser detectadas a una corta distancia por delante del vehículo ya que el sensor emite rayos que divergen con la distancia como ya se ha indicado. En este sentido, el disponer sólo de la información de las líneas delante del vehículo no permite una distancia de anticipación para el control suficiente y puede dar lugar a fluctuaciones en las señales de control por malas estimaciones de la geometría de la línea, por lo que la reconstrucción de las líneas en los puntos que el vehículo ha recorrido aumenta bastante fiabilidad a los resultados. Por otra parte, el algoritmo propuesto no requiere de posicionamiento GPS por lo que no está condicionado por la calidad de esta señal. Se han realizado pruebas del algoritmo en entornos reales con resultados muy satisfactorios de estimación estable y robusta de las variables necesarias para el guiado.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (proyecto TRA2013-48314-C3-2-R) y la Red de Excelencia de la Comunidad de Madrid SEGVAUTO-TRIES.

7. Referencias

- [1] Aranda, M. B. La conducción automatizada. De la conducción asistida a la conducción automatizada. En “Sistemas de asistencia al conductor y de gestión inteligente del tráfico”, ASEPA, 2014
- [2] Caraffi, C., Cattani, S., Grisleri, P., 2007. Off-road path and obstacle detection using decision networks and stereo vision. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 8 (4), 607–618.
- [3] Fuerstenberg, K.Ch., Dietmayer, K.C.J., Eisenlauer, S., Multilayer laserscanner for robust object tracking and classification in urban traffic scenes. In: 9th World Congress on Intelligent Transport Systems, Chicago, November 2002.
- [4] Aufrère, R. et al., 2003. Perception for collision avoidance and autonomous driving. *Mechatronics*, 13, pp. 1149–1161
- [5] Shimonura, N. et al., 2002. An algorithm for distinguishing the types of objects on the road using laser radar and vision. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3 (3), pp. 189–195
- [6] Naranjo, J. E., Jiménez, F., Aparicio, F., Zato, J. GPS and inertial systems for high precision positioning on motorways. *The Journal of Navigation*. Vol 62, nº 2, pp 351–363, 2009
- [7] Jiménez, F., Naranjo, J. E. Nuevos requerimientos de precisión en el posicionamiento de vehículos para aplicaciones ADAS. *Dyna Ingeniería e Industria*. Vol 84, nº 3, pp 245 – 250 (2009)
- [8] Zhang, P., Gu, J., Milios, E., Huynh, P. Navigation with IMU/GPS/digital compass with unscented kalman filter, in: *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics Automation*, Niagara Falls, ON, Canada, July 2005, pp. 1497–1502.
- [9] Jiménez, F. Evaluación a priori de la precisión de mapas electrónicos. *Dyna Ingeniería e Industria*. Volumen 85, nº 3, pp 255 – 262, 2010
- [10] Liu, J., Liang, H., Wang, Z., Chen, X. A Framework for Applying Point Clouds Grabbed by Multi-Beam LIDAR in Perceiving the Driving Environment. *Sensors* 15, 21931-21956, 2015

- [11] DGT. Instrucción 15/V-113. Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general. Ministerio del Interior
- [12] Naranjo, J. E., Jiménez, F., Gómez, O., Zato, J. G. Low level control layer definition for autonomous vehicles based on fuzzy logic. *Intelligent Automation and Soft Computing*. Volumen 18, nº 4, pp 333-348, 2012
- [13] Jiménez, F., Naranjo, J. E., Gómez, O. Autonomous collision avoidance system based on an accurate knowledge of the vehicle surroundings. *IET Intelligent Transport Systems*. Volumen 9, nº 1, pp 105 – 117, 2015
- [14] Buehler, M. et al., 2009. The DARPA Urban Challenge: Autonomous Vehicles in City Traffic, Springer Tracts in Advanced Robotics, 56.
- [15] Jiménez, F., Naranjo, J. E. Improving the obstacle detection and identification algorithms of a laserscanner-based collision avoidance system. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol 19, nº 4, pp 658-672, 2011
- [16] Cheein, F.A.A. et al., 2010. SLAM-based turning strategy in restricted environments for car-like mobile robots. *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp.602–607.
- [17] Petrovskaya, A. & Thrun, S., 2009. Model based vehicle detection and tracking for autonomous urban driving. *Autonomous Robots*, 26(2-3), pp.123–139.
- [18] Wender, S. & Dietmayer, K. 2008. 3d vehicle detection using a laser scanner and a video camera. *Intelligent Transport Systems, IET*, 2(2), pp.105–112.
- [19] Leonard, J. et al., 2008. A perception-driven autonomous urban vehicle. *Journal of Field Robotics*, 25(10), pp.727–774.
- [20] Jiménez, F. et al., 2011. Can low-cost road vehicles positioning systems fulfil accuracy specifications of new ADAS applications?. *Journal of Navigation*, 64(2), pp. 251–264,.
- [21] Vera, C. & Félez, J. 1994. Dinámica vehicular basada en la técnica del BOND GRAPH. Madrid: Publications Section of the ETSII.